

ZÁRÓJELENTÉS

Kvantitatív Makyoh-topográfia
2002–2006, T 037711

Témavezető: Riesz Ferenc

1. Bevezetés és célkitűzés; előzmények

A korszerű félvezető-technológiában alapvető fontosságú a szeletek felületi topográfiájának, az ideális síkjellegtől való eltérésének a minősítése. Ez vonatkozik nemcsak a kiinduló hordozókra, hanem a technológiaközi ellenőrzésre is, hiszen számos technológiai eljárás (fémzés, epitaxiális rétegépítés, védőréteg-leválasztás, mintázatkialakítás) is okozhatja a szelet síkjellegének vagy görbületének a megváltozását. A korszerű nagy átmérőjű (> 300 mm) szeletek megjelenésével a síkjelleg problémája és így a megfelelő minősítési eljárás szükségessége fokozottabban jelentkezik. A felületek síkjellege más – nem félvezető – alkalmazásoknál is (optikai elemek, csúszó mechanikai elemek, esztétikai szempontból fontos burkolatok stb.) fontos. A síkjelleg vizsgálatára igen elterjedtek a különféle módszerek, pl. a kapacitív elvű módszerek, az interferometria, a mechanikai vagy optikai pásztázó eljárások.

A 80-as években egy új vizsgálati eljárás jelent meg a félvezető hordozók simaságának a vizsgálatára: az ún. *Makyoh-topográfia*. Az eljárás lényege a következő: a tükröjellegű vizsgált felületre homogén intenzitás-eloszlású, kollimált fénynyaláb esik, a visszavert nyalábot aztán egy, a mintától távol levő ernyő fogja föl. Ha a minta tökéletesen sík, az ernyőn egy egyenletes fényeloszlású folt jelenik meg. Ha azonban a mintán felületi egyenetlenségek találhatók, ezek a visszaverődő fénysugár párhuzamosságát megzavarják, és az ernyőn a felületi topográfiát valamilyen módon visszatükröző kép jelenik meg. A Makyoh japán szó, jelentése varázstükrő, és egy olyan ősi, a Távol-Keletről származó szakrális felhasználású tükröt jelöl, amely a *hátdoldalán* kialakított domborművű ábra képét vetíti egy távoli falra. A hátdoldali ábra a megmunkálás közben az előoldalon szabad szemmel nem látható mikrodeformációkat okoz; ez okozza a vetített képet. Az eljárást a 90-es években már elterjedtebben alkalmazták különféle félvezető minták vizsgálatára. A gyakorlatban az egyszerű alapelrendezést kollimátorlencsével ellátott pontszerű fényforrással és kamerával egészítik ki. Makyoh elvű, félvezető szeletek nagy sorozatú vizsgálatára alkalmas berendezés kereskedelmi forgalomban is kapható. Az eljárás előnye – a többi (főleg az interferometrikus) optikai módszerhez képest – rendkívüli egyszerűsége, olcsósága, gyorsasága, érzékenysége és nagy dinamikai tartománya, valamint a mechanikai rezgésekkel szembeni viszonylagos érzéketlensége. A nagy felületek sík jellegének gyors, érzékeny, ipari körülmények közt is alkalmazható vizsgálatára a Makyoh-topográfia gyakorlatilag *versenytárs nélküli*.

Intézetünkben a Makyoh-topográfiával kapcsolatos kutatások a közlemények első nagy hullámának a megjelenése után közvetlenül, a 90-es évek elején kezdődtek. Épült egy berendezés, amelyet sikerrel alkalmaztunk GaAs hordozók válogatására és felületi előkészítésének vizsgálatára. A jelen pályázat közvetlen előzményének tekinthető *A Makyoh-topográfia képalkotási mechanizmusának kísérleti és elméleti vizsgálata* c. OTKA pályázat (F 25224, 1998–2000). E pályázatban tisztáztuk a képalkotás fizikáját és a leképezés főbb összefüggéseit, és rámutattunk a kvantitatív értelmezés nehézségeire. Irodalmi előzményekre támaszkodva megmutattuk, hogy a vizsgált felületre vetített négyzetrács képe segítségével a rácpontokban a felületi profil meghatározható (kvantitatív Makyoh-topográfia). A négyzetrács rácpontjainak a képen mért eltolódása a felület gradienseivel arányos; a sík referenciamintán mért értékekkel összehasonlítva e gradiensek feltérképezhetőek, és a topográfia a rács pontjaiban a gradiensek integrálásával kiszámítható.

A jelen pályázat elsődleges célkitűzése a már megértett alapokról kiindulva a leképezés alapvető tulajdonságainak további tisztázása, mérési összeállítások és kiértékelő algoritmusok kidolgozása és azok tulajdonságainak a vizsgálata, immár igényes metrológiai célok szeme előtt tartásával, valamint az alkalmazási lehetőségek szélesebb körű feltárása.

2. Az elért eredmények összefoglalása

Az eredmények a jelentés szerves részét képező közleményekben kerülnek részletes ismertetésre. Itt csak egy rövid, tézisszerű összefoglalást adunk. A tudományos eredményeket két csoportba sorolhatjuk: (1) módszertani eredmények és (2) alkalmazások.

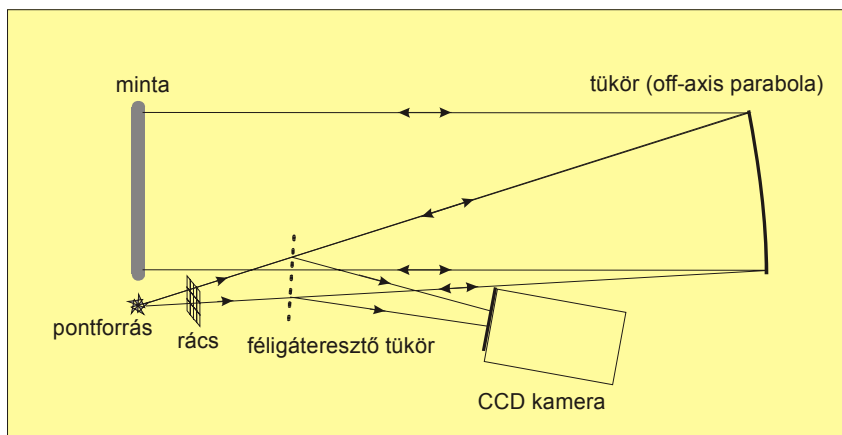
Mivel a jelen kutatási projekt egy korábbi pályázat szerves folytatása, elkerülhetetlen volt, hogy annak eredményeire ne hivatkozzunk.

2.1. Módszertani eredmények

2.1.1. Berendezésfejlesztés, mérési módszerek kutatása

- Új koncepciójú, tükrő alapú Makyoh-topográfiás berendezést terveztünk és építettünk meg. A berendezés a korábban leképező elemként használt lencse helyett eltolt fókuszú (off-axis) beállításban üzemelő parabolatükröt alkalmaz leképezésre. A rendszer nagyfelbontású (1280 × 960

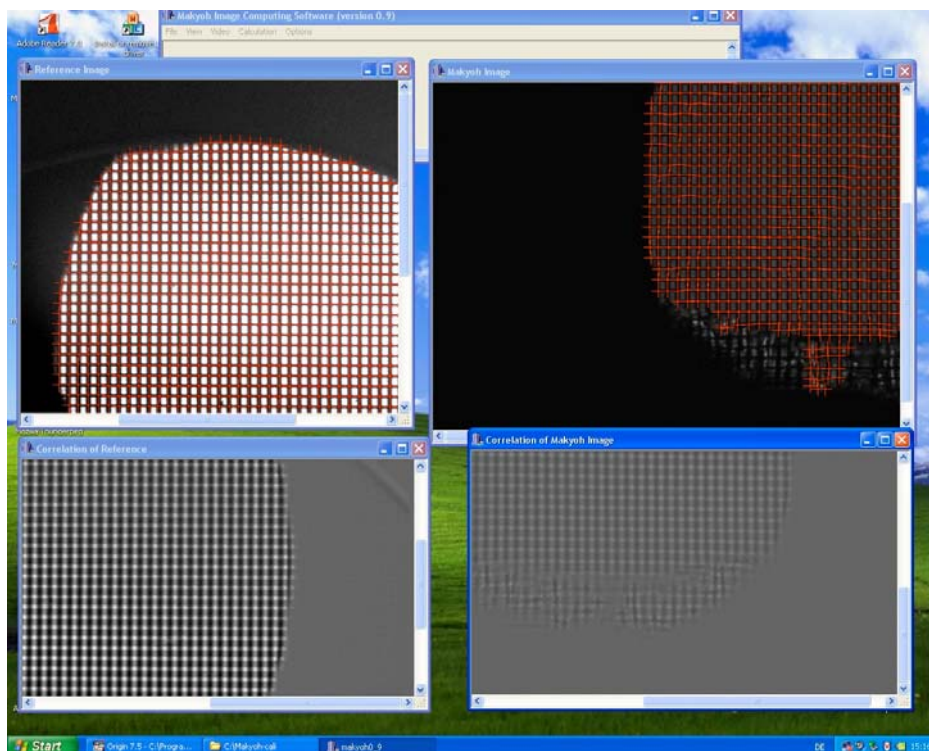
képpont) CCD kamerát tartalmaz, amely IEEE 1394 szabványú digitális interfésszel csatlakozik a számítógéphez. Az előnyök: (1) megnövekedett és széles határok közt változtatható érzékenység, (2) gyakorlatilag torzításmentes leképezés és (3) méretbeli skálázhatóság (450 mm mintaátmérőig megfelelő tükrök kereskedelemben kapható). Kísérletileg is demonstráltuk a megnövekedett érzékenységet és a torzításmentes leképezést. Kísérleteink során tisztáztuk az optikai elemek szükséges specifikációit. Nagy pontosságú ($\lambda/20$) sík referenciatükröt szereztünk be. A berendezés kb. 12 cm átmérőjű szeletek vizsgálatára alkalmas. A felületi topográfia egy tipikusan 20×20 -as rács pontjaiban határozható meg, a demonstrált legkisebb magasságeltérés a rács szomszédos pontjai között mérve kb. 100 nm. Az alábbi ábra mutatja az összeállítás vázlatát.



- Új koncepciójú, a megvilágító és a mérő fénypárból külön-külön gömbtükröket alkalmazó Makroh-topográfiai berendezést terveztünk és építettünk meg. A berendezés kb. 150 mm átmérőjű szeletek vizsgálatára alkalmas. Előnye a parabolatükrös rendszerrel szemben a kisebb költség, hátránya az optikai aberrációk jelenléte és a bonyolultabb mechanikai felépítés. Demonstráltuk, hogy a berendezés a teljes szeletátmérőre vetített néhány mikron behajlást képes érzékelni. Közel sík felület interferometriával mért topográfiáját összehasonlítottuk a berendezéssel mérttel, és megállapítottuk, hogy az eltérés sehol nem haladja meg a 6%-ot.
- Az Oxfordi Egyetemmel együttműködésben eltolt rácsú megvilágítást és szekvenciális képfelvételt alkalmazó kvantitatív Makroh-topográfiai mérési eljárást dolgoztunk ki. Az eljárás azáltal növeli meg a rács sűrűségét – s ezáltal a mérés laterális felbontását és pontosságát –, hogy a rácsperiódus törtrészeivel eltolt képek sorozatát fölve majd azokat összefésülve egy effektív, az eltolás mértékével egyenlő periódussal rendelkező rácsot hoz létre. A gyakorlati megvalósításhoz a legcélszerűbb kétállapotú tükrökből álló programozható mátrixot használni. Ilyen eszközt jelenleg kizárólag a Texas Instruments gyárt. A berendezés első változatát Oxfordban építettük meg, az akkor korlátozott ideig kapható „DMD evaluation board” felhasználásával (ennek felbontása 800×600 képpont volt). Az elért laterális felbontás kb. 0,7 mm volt egy 75 mm átmérőjű szeleten. Egy szilícium szelet interferometriával mért topográfiáját összehasonlítottuk a berendezéssel mérttel, és jó egyezést észleltünk (viszonylag jelentős maximum 10%-os eltérés csak a szelet egy kisebb területén volt). Kiértékelő algoritmust dolgoztunk ki, amely elvégzi a rácsok összefésülését. Később megkezdtuk az elrendezés hazai megvalósítását. Ehhez már a 2004-ben piacra dobott, azóta szabadon megvásárolható, általunk 2005-ben beszerzett 1024×768 képpont felbontású „DMD Discovery kit” nevű programozható tükrömátrixot használtuk fel. (A korábban, még a DMD szabad hozzáférhetősége előtt e célra beszerzett kivetítő berendezés intézetünk más projektjeiben hasznosult.) A jelentés írása idején a mechanikai rész készen áll, jelenleg a programozás folyik.
- A kétdimenziós gradiensmező numerikus integrálközelítő összegének kiszámításához rekurzív elvű algoritmust dolgoztunk ki, amely nagy sebességgel és kis hibával képest a számítást végrehajtani. Az integrálás ugyanazt az eredményt adja, mintha a középpont és az adott rácsponthoz tartozó két pont által kifeszített téglalap összes lehetséges útvonalán számított összegek átlagát képeznénk.
- Analitikus számítások és számítógépes szimulációk útján vizsgáltuk a rácsos megvilágítású topográfia-kiértékelő eljárás pontosságát. Megmutattuk, hogy a mérési hibáknak két összetevője van: (1) a pixelleolvasási hiba és (2) az integrálközelítő összegzés hibája. Megállapítottuk, hogy a minta–ernyő távolság (L) kis értékei mellett a pixelleolvasási hiba, míg a nagyobb értékei mellett az összegzés hibája dominál. Az előbbi hiba L növelésével csökken, míg az utóbbi független tőle.

Kimutattuk, hogy nagy számú rácspont esetén (kb. 30×30 rácspont fölött) a fent ismertetett rekurzív eljárás segítségével kiértékelt felületi topográfiában műtermékek: a tengelyekkel párhuzamos csíkok jelennek meg, amit az összegzési algoritmus sajátosságai okoznak. E hiba elkerülésére új kiértékelési algoritmust dolgoztunk ki, amely a közvetlen összegzés helyett iteratív eljárást alkalmaz. A két módszert kísérletileg is összehasonlítottuk az eltolt rácús összeállítás segítségével, és igazoltuk a műtermék megszűnését. Az iteratív módszer hátránya lassúsága.

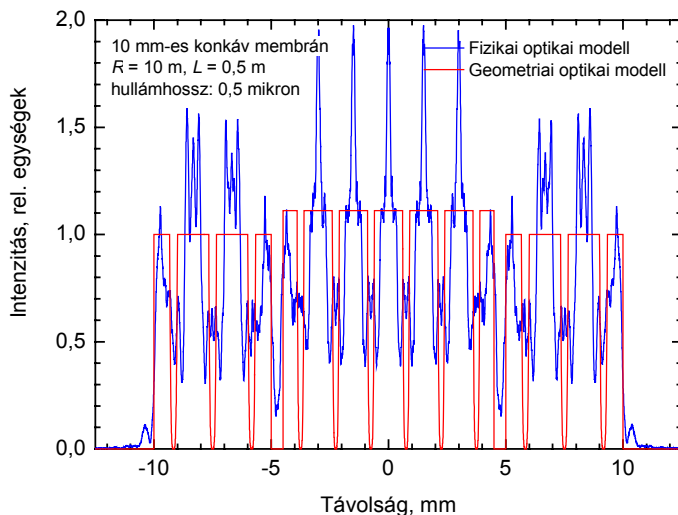
- Mérőszoftvert írtunk a vetített rácisos mérés kiértékelésére. A szoftver alkalmas tetszőleges konvex alakú, a képmező középpontját tartalmazó minta felületi topográfiájának mérésére. A program felhasználóbarát, kényelmesen kezelhető menürendszerrel rendelkezik, a kiszámított topográfiát szürkeárnyalatú térkép és numerikus mátrix formájában szolgáltatja. Az alábbi ábra egy jellegzetes képernyőképet mutat.



2.1.2. A képalkotás tulajdonságainak a vizsgálata

- Elméletileg tanulmányoztuk a kvalitatív és a kvantitatív Makyoh-topográfia érzékenységi küszöbét. Az optikai rendszerek modulációs átviteli függvényével analóg formalizmust dolgoztunk ki, mely szinuszgörbével leírható felületből indul ki, és az érzékenységet a képkontraszt segítségével fejezi ki. Analitikus összefüggéseket vezettünk le az érzékenységi küszöbre, amelyek tartalmazzák a felületi struktúra és a mérési berendezés paramétereit és figyelembe veszik a legfontosabb másodlagos hatásokat: a felületi érdességet és a véges fényforrásméretet is. Ezen összefüggések jól leírják az általunk észlelt és az irodalomban is leírt tapasztalatok tendenciáit. Megmutattuk, hogy a kis térbeli periódussal jellemezhető felületi struktúrák esetében a kvalitatív változat érzékenyebb.
- Kísérleti eredményeink, irodalmi adatok és elméleti megfontolások alapján világossá vált, hogy a megvilágítás koherenciatulajdonságai egyrészt az erősen strukturált felületek esetén, másrészt a képen található nagy intenzitású elemek (fókuszpontok és -vonalak) környezetében jutnak szerephez, ugyanis ezekben az esetekben kell diffrakciós hatásokkal számolni. Ezt a tapasztalatot a gömbtükrös és a parabolatükrös rendszer esetében alkalmazott szélessávú (fehér fényű) megvilágítással is igazoltuk. Ezek a tartományok a Makyoh-topográfia szokásos alkalmazási területein többnyire kívül esnek, illetve az elhajlási minták a képen lokalizálhatók.
Joggal merülhet föl, hogy a sekély (hullámhossznál kisebb) mélységű felületi struktúrák esetében a diffrakciós jelenségek befolyásolhatják a vetített rácspontok képének a helyzetét (a számításokban használt geometriai optikai közelítéshez képest). Ennek eldöntésére néhány jellemző paraméterrel szimulációkat végeztünk: egy dimenzióban sík felületen körív alakú bemélyedések vetített rácisos

Makyoh képét számítottuk ki geometriai optikai és fizikai optikai közelítésben. Megállapítottuk, hogy a gyakorlatban fontos esetekben a rácspontok helyzetében elhanyagolható eltolódás csak a bemélyedés széléhez közel észlelhető. Ez igazolja a geometriai optikai közelítést. A számítások illusztrálására egy jellemző példát mutat az alábbi ábra.



- Egy, a European Journal of Physics c. folyóiratban megjelent cikkhez írt megjegyzésben alternatív levezetést mutattunk be a kis felületi görbületek esetén keletkező Makyoh-kép leírására. Felismertük, hogy a Makyoh-kép intenzitáseloszlásának a kifejezése ebben a közelítésben nem tartalmazza a felület gaussi görbületét.

2.2. Alkalmazások

- Befejeztük az emberi vesekövek csiszolt metszeteinek a korábbi kapcsolódó OTKA pályázat keretében megkezdett vizsgálatát. Kimutattuk a követ alkotó rétegek különböző felületi mélységét és érdességét; ezek az adatok kvalitatív egyezést mutattak az interferometrikus módszerrel mért felületprofil- és érdesség-adatokkal, valamint az optikai és pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálatok eredményeivel. A kő egyes rétegeinek röntgendiffrakcióval meghatározott összetétele alapján a keménység irodalomból vett adatai jól korreláltak a felületprofil- és érdesség-adatokkal: a puhább rétegek érdesebbek és mélyebben fekszenek. Vizsgáltuk a csiszolási technológia hatását is, és megállapítottuk, hogy a második csiszolási lépés után (1) a felületi érdesség csökken, és (2) a hosszútávú morfológiai egyenetlenség eltűnik (a csiszolás mintegy tökéletes síkbeli metszetet valósít meg). Összehasonlítottunk három különböző követ, és jellemeztük a kövek csiszolási felületének különböző érdességét a köveken belül és az egyes kövek között.
- A Bolgár Tudományos Akadémia Szilárdtestfizikai Intézetével együttműködésben Makyoh-topográfiai vizsgálatokat végeztünk különféle anyagú (üveg, szilícium, rozsdamentes acél, titán, természetes opál) és felületi tulajdonságú hordozókon illetve azokon növesztett hidroxi-apatit rétegeken. E rétegek emberi szervezetbe ültetett implantátumok (fogászati implantátumok, csípőprotézisek stb.) bioaktivitását és biokompatibilitását biztosítják. A vizsgálatok célja a hosszútávú morfológiai és reflexiós tulajdonságok feltárása volt. Megállapítottuk, hogy a felületi reflexió változásán keresztül a rétegvastagság egyenetlensége közvetett módon tanulmányozható, és a felületi előkészítés mikéntje detektálható morfológiai változásokat okoz. Kimutattuk, hogy a rozsdamentes acél hordozóba Ca és P ionokkal végzett implantáció a hordozó felületi morfológiájának makroszkopikus durvulását okozza; a hőkezelés a morfológia részleges kisimulását eredményezi. Más anyagú hordozó esetében ez a durvulás nem volt észlelhető.
- Si hordozón kialakított Si/SiN membrán-szerkezetek deformációját vizsgáltuk (ez is a korábbi OTKA pályázat részfeladatának folytatása). Kimutattuk és számszerűsítettük a membránok és a hordozó

membránokat körülvevő területének a deformációját; összefüggést találtunk a deformáció mértéke valamint a membránok vastagsága és mérete között. Vizsgáltuk az egyes technológiai lépések hatását is, és megállapítottuk, hogy a hordozó adalékolása és az adalékeloszlás homogenizálását célzó hőkezelés nagymértvű nyomófeszültséget és a membránok kihajlását okozza, ezt kismértékben kompenzálja a SiN réteg húzófeszültsége.

- Si/SiGe és InP alapú heteroszerkezetek illetve fém-félvezető átmenetek felületi morfológiáját és görbületét vizsgáltuk. Megállapítottuk, hogy a Si/SiGe szerkezeteken pontszerű felületi hibák találhatók, amelyek összefüggésben lehetnek az elektromos viselkedésben is mutakozó hibahelyekkel, továbbá, hogy az InP rétegek erős adalékolása a minta egyenletes görbületét okozza.
- Befejeztük a processzált Si szeletek áramkörökének marással és csiszolással történő eltávolításának a szelet deformációjára gyakorolt hatásának vizsgálatát. (Ezt a részfeladatot a korábbi kapcsolódó OTKA pályázat keretében kezdtük el.) Megállapítottuk, hogy az egyes áramköri rétegek kémiai marással való eltávolítása a szelet görbületének egyenletes megváltozását eredményezi, míg az utolsó lépésként alkalmazott csiszolás egyenetlen deformációt okoz. Megmutattuk, hogy az eredetileg simább szeletek a csiszolás után is simábbak maradnak. A csiszolt szeleteken egyes esetekben elkülönített felületi hibákat (bemélyedés) is észleltünk, amelyek kialakulására modellt alkottunk. E kísérletek modellül szolgáltak egy perspektivikus ipari hasznosításhoz, a használt félvezető szeletek újrahasznosításában, az ún. „wafer reclaim” technológiában való minősítő eljárásaként való alkalmazáshoz (erről részletesen szolunk a 3.3. pontban illetve a beszámolóban az eredmények hasznosítását tárgyaló szakaszában).
- Rácsillesztetlen InGaAs/GaAs heteroszerkezetek feszültségi állapotát és hibahely-sűrűségét a Lengyel Tudományos Akadémia Fizikai Intézetével együttműködésben nagyfelbontású röntgendiffrakcióval tanulmányoztuk. Megállapítottuk, hogy – a Makyoh-topográfiás vizsgálatokkal összhangban – a mintákban elhanyagolható mértékű mechanikai feszültség van. A Makyoh-topográfiával bizonyos mintákban kimutatott durva felületi morfológiát a reciprokrácsban a hordozó csúcsának inhomogén kiszélesedése kíséri. Ennek alapján megállapítottuk, hogy a durva morfológia oka a hordozó tulajdonságaiban, valószínűsíthetően a felületi előkészítésben keresendő.

3. A kutatási eredmények alkalmazásai; közvetlen és áttételes hasznuk

3.1. Az eredmények közzététele

A kutatási eredményekről 16 megjelent vagy megjelenés alatt álló folyóiratcikkben és hét, kiadványban megjelent vagy elfogadott konferencia-előadásban számoltunk be. Ezekon kívül négy publikálatlan (illetve egyoldalas kivonat formájában közzétett) előadásban ismertettük az eredményeket. A kutatás eredményeinek nemzetközi elismerését három meghívott köztribúció (egy folyóiratcikk, egy konferenciaelőadás és egy könyvfejezet) is jelzi.

3.2. Részvétel a posztgraduális oktatásban

A témában az egyik résztvevő, Lukács István Endre 2006-ban sikerrel védte meg a témavezető irányításával készített *Makyoh-topográfia tükrözjellegű felületek vizsgálatára* c. Ph. D. értekezését (az értekezés letölthető a http://dept.phy.bme.hu/phd/dissertations_hu.htm címről).

3.3. Gyakorlati alkalmazások

A Makyoh-topográfia bevett technológaminősítő módszerré vált intézetünkben. A félvezető-technológiai-szenzorikai labor részére számos vizsgálatot végeztünk el. A vizsgálatok célja szeletválogatás, technológiai folyamatok minősítése (leválasztott vékonyrétegek mechanikai feszültségének mérése, plazmaimerziós technikával implantált Si szeletek deformációjának a vizsgálata) és anyagtudományi kutatás (SiN mátrixban Si mikrokristályokat tartalmazó nanoszerkezetek) volt.

A kutatás eredményei fontos alkalmazásra találtak az ANNA (European Integrated Activity of Excellence and Networking for Nano and Micro-Electronics Analysis) EU projektben. E projekt keretében nemzetközi virtuális labort fogunk kiépíteni, amelyben intézetünk többek közt a Makyoh-topográfiával lesz jelen. A projekt hivatalosan 2006 decemberében indult.

A HYPHEN (Hybrid Substrates for Competitive High Frequency Electronics) című, 2005 októberében indult EU FP6-os projekt keretében SiC alapú kompozit hordozók morfológiáját és felületi simaságát tanulmányoztuk. E kutatás célja GaN rétegek növesztésére alkalmas hordozók előállítás.

A kutatás eredményeinek legtöbbet ígérő alkalmazása az erlangeni Fraunhofer Intézettel való együttműködéshez kötődik. Az intézet megrendelt tőlünk egy Makyoh-topográfiás berendezést (erről részletesen szólunk a beszámolóban az eredmények hasznosítását tárgyaló szakaszában), amelyet megépítettünk és üzembe állítottunk. Az eljárást Si szeletek újrahasznosítása technológiai lépéseinek a minősítésére kívánják alkalmazni. A rácsos megvilágítással kombinált parabolatükrös mérési összeállításra közös szabadalmat nyújtottunk be és nyertünk el, mely az EU-ban és az USA-ban nyert védettséget.

3.4. Kiegészítő támogatási források

A berendezés nagyteljesítményű számítógépes képfeldolgozó rendszerét OTKA műszerpályázat keretében szereztük be. A 2004-ben elnyert GVOP műszerpályázat (Flexibilis Makyoh-topográfia) támogatásával optikai elemeket (mozgatók, pozicionálók, optikai asztalok stb.) szereztünk be.

Kétoldalú akadémiai együttműködési projektekből fedeztük a Lengyel és a Bolgár Tudományos Akadémiák intézményeiben tett kölcsönös rövid látogatásokat valamint számos konferencia-résztvételt. Az Oxfordi Egyetemmel kapcsolatos kutatócserét a The Royal Society of London mobilitási projektje támogatta; az Erlangeni Fraunhofer Intézettel való kapcsolatot egy DAAD–MÖB program szolgálta.

4. Összegzés és a kutatás további lehetséges irányai

Az ismertett kutatás keretében olyan eredményekre jutottunk, amely egy már ismert és alkalmazott vizsgálati eljárást tett alkalmassá gyakorlati metrológiai célokra. A kidolgozott elveket mérési összeállításokkal demonstráltuk. A kutatás eredményességét bizonyítja a számos – részben a jelen pályázat, részben független projektek keretében – megvalósított alkalmazás, valamint az elfogadott szabadalom.

Az elért eredmények számos továbblépési lehetőséget jelölnek ki. A beszerzett DMD tükrömátrix segítségével tetszőleges bináris – további hardver-kiegészítéssel szürkeárnyaltos – mintázat valósítható meg. A Makyoh-topográfia négyzetrácsán túllépve ez lehetővé teszi a strukturált megvilágítást hasznosító különféle optikai metrológiai módszerek független és összehasonlító vizsgálatát, fejlesztését. A tükrömátrixszal megszerzett tapasztalatok minden olyan területen is hasznosulhatnak, amelyek térbelileg címzett optikai gerjesztést igényelnek.